

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

## SIMULATION OF PROCESSES AND MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 1. С. 45—52.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-1-45-52

УДК 539.1.71.002

### Алгоритм работы электронного тракта детектора телевизионного типа и теоретические модели для описания модифицированной кривой Брэгга

© 2019 г. В. В. Сиксин<sup>§</sup>

*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,  
Ленинский просп., д. 53, Москва, 119991, Россия*

**Аннотация.** Рассматриваются особенности разработки электронного тракта телевизионного канала в детекторе телевизионного типа. Отмечено, что режим бининга (сложения пикселей) является наиболее сложным в технической реализации.

Проведены расчеты по совершенствованию математической модели для вычислителя детектора телевизионного типа. Определены параметры аналитической формулы, справедливой для энергий протонов от 30 до 250 МэВ, в основе которой применена комбинация функций параболического цилиндра, согласуемая с численными методами и новыми экспериментальными данными. Приводится список теоретических работ описывающих модифицированную кривую Брэгга.

Предлагается возможность нового подхода в описании дозного поля пика Брэгга заключающийся в применении так называемого «полного опыта», когда для экспериментально измеряемых характеристик дозного распределения составляется система уравнений, в которых измеряемые величины представляются как функции так называемых «амплитуд дозного поля». «Амплитуды дозного поля» определяются из решения этой системы уравнений. «Амплитуды дозного поля» зависят от координат  $x$  и  $z$  в водном фантоме, где  $z$  — ось направления пучка и после определения амплитуд из системы описанных уравнений — определенные амплитуды применяются для быстрого предсказания измеряемых характеристик дозного распределения. Сочетания адаптивного электронного тракта работающего самостоятельно без участия оператора при проведении эксперимента по калибровке ускорителя и при определении экспериментально измеряемых характеристик дозного распределения, позволяет в режиме on-line подготовить терапевтический ускоритель «Прометеус» к проведению сеанса с пациентом.

**Ключевые слова:** режим бининга, адаптивный электронный тракт, водный фантом, пики Брэгга, детектор телевизионного типа, аналитическое описание пика Брэгга, «амплитуды дозного поля»

#### Введение

На протяжении последних лет карандашные протонные пучки все шире применяются для проведения медико-биологических исследований, а также в клинической практике. Особенно повышается интерес радиобиологов и радиологов-клиницистов к протонному ускорителю «Прометеус» за его малогабаритность, небольшую стоимость и перспективы широкого внедрения в клиническую практику.

За последние несколько лет был разработан и внедрен на ускорителе «Прометеус» в ФТЦ ФИАН принципиально новый детектор телевизионного типа (**ДТеТ**), который калибрует ускоритель и измеряет дозные распределения в имитаторе пациента — водном фантоме.

В работах [1, 2] было осуществлено уверенное наблюдение энергосвечения протонного пучка в водном фантоме ДТеТ — в диапазоне энергий от 30 до 260 МэВ — позволяющие быстро определять основные дозовые характеристики протонного пучка. Это стало возможным после разработки высокочувствительного электронного тракта де-

**Сиксин Виктор Валентинович** <sup>§</sup> — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, antktech@yandex.ru

<sup>§</sup> Автор для переписки

тектора ДТеТ. Для наблюдения светового сигнала от водного фантома требовалась чувствительность детектора ДТеТ на уровне  $E_{\text{ПОР}} = (1,0 \div 3,0) \cdot 10^{-5}$  лк. Для этого в электронном тракте ДТеТ были применены два специальных режима повышения чувствительности — бининг (объединение пикселей) и суммирование кадров (накопление) [3—4].

Цель работы — является краткое описание основных особенностей электронного тракта детектора ДТеТ, а также описание основных принципов и подходов в аналитическом описании пиков Брэгга и применении «амплитуд дозного поля». Целью работы так же является поиск новых аналитических подходов и анализ существующих возможностей для аналитического описания кривой Брэгга для применения ее в протонной терапии на ускорителе «Прометеус», с чего начинается любая работа над формированием дозного распределения на пучках протонов

#### Принцип циклограммы для получения событий экспериментальных кадров с разным временем экспозиции

Кроме применения двух выполненных режимов бининга и суммирования кадров [3—4] — был применен особый режим электронного тракта детектора ДТеТ по включению событий для обработки с разной «выдержкой кадров» (разной экспозицией). Для этого подбиралась разная временная длительность «фаз» между импульсом ускорителя и «основным кадром» с достоверно известным суммарным временем накопления 320 мс (16 кадров с временем накопления 20 мс складываются в один кадр).

Отметим, что изменения суммарного времени накопления при малых яркостях не происходит, так как автоматический механизм адаптации электронного тракта детектора ДТеТ не реагирует на малые колебания яркостей (и событие данного кадра регистрируется, как только часть импульса от ускорителя). То есть этот режим «включения разных экспозиций» — работает как электронная схема дискриминации событий по режиму отбора кадров с нужной длительностью по времени экспозиции.

Включение кадров с нужной длительностью по временам экспозиции (с меньшими временами накопления) получают из-за специального временного смещения «основного кадра» длительностью 320 мс и импульса от ускорителя длительностью 300 мс, а также наличия интервала между импульсами ускорителя, равного 2000 мс (2 с).

На рис. 1 показана циклограмма по длительности первых 17-ти кадров и импульсы ускорителя с соответствующей длительностью (по 300 мс каждый, соответственно) и интервалами 2000 мс (2 с).

В соответствии с циклограммой начало первого кадра видеозаписи К1 совпадает с началом первого импульса ускорителя Имп. 1, т. е. здесь фиксируется полная длительность первого импульса. Из-за разницы в длительности импульса и длительности кадра в 0,02 с (0,32—0,30), второй импульс Имп. 2 попадает на два кадра — К8 и К9, причем кадр К8 зафиксировывает часть второго импульса, равную по длительности 260 мс, а К9 зафиксировывает оставшуюся часть импульса, равную по длительности 40 мс. Соответственно третий импульс Имп. 3 попадет на кадр К15 и К16, причем кадр К15 зафиксировывает часть третьего импульса, равную по длительности

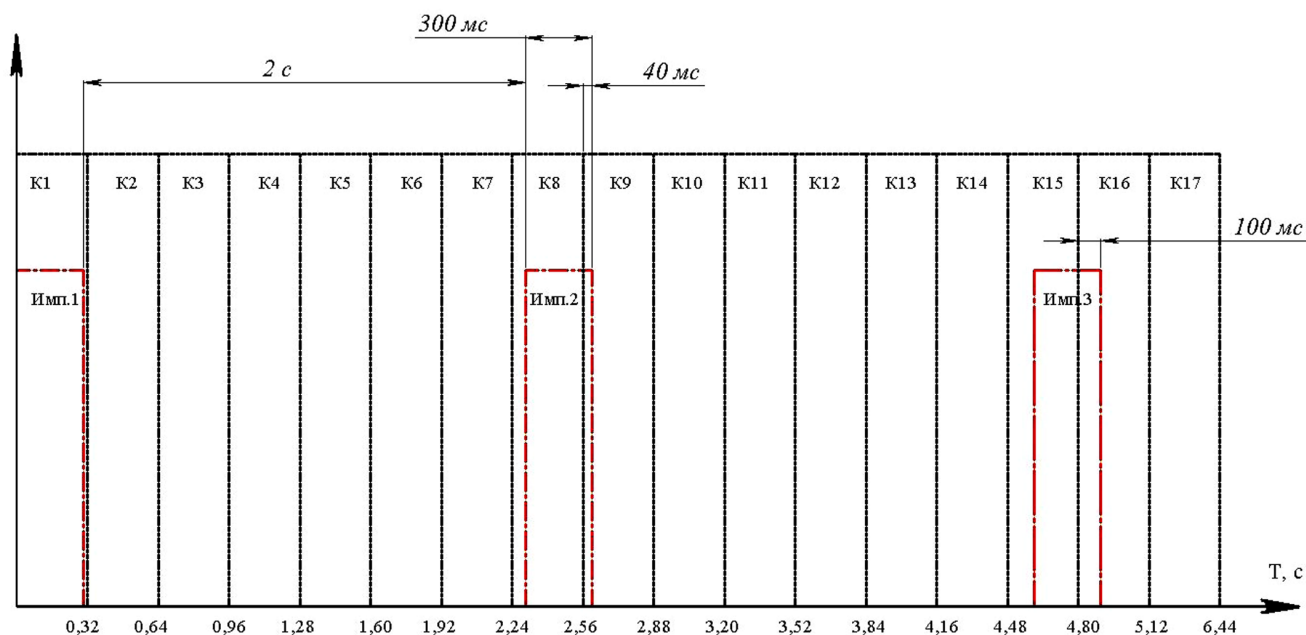


Рис. 1. Циклограмма работы электронного тракта телевизионного канала и подачи импульсов от ускорителя  
Fig. 1. The cycle diagram of the electronic path of the television channel and the supply of pulses from the accelerator

сти 200 мс, а K16 зафиксирует оставшуюся часть третьего импульса, равную по длительности 100 мс. Последующие кадры будут фиксировать как полный соответствующий импульс, так и части последующих импульсов, кратные по длительности 20 мс (разнице времен длительности кадра и импульса 0,32—0,30).

На рис. 2 [1, 2] приведены события зарегистрированные детектором ДТеТ для режима «включения разных экспозиций». Все события зарегистрированные на рис. 2 принадлежат к энергии пучка протонов 100 МэВ. На самом нижнем кадре включена максимальная экспозиция кадра равная 320 мс — при этом зарегистрирован весь импульс от ускорителя равный 300 мс. Следующие четыре события (соответственно — снизу вверх) соответствуют временам экспозиции — 100, 60, 40 и 20 мс. Мы видим на рис. 2 на кадрах событий уменьшение яркости и измеряемой ширины поперечного профиля энергосвечения (пика Брегга) — измеряемая форма этих профилей хорошо согласуется с расчетами программой FLUKA [6, 7]. По этим расчетам и экспериментально измеренным профилям в конце статьи обсуждается — способ определения, так называемых «амплитуд дозного поля» — определив которые, можно быстро считать основные клинические параметры глубинного и поперечного профиля пика Брегга.

#### Аналитическая модель для описания пика Брегга

Одним из первых авторов, которые описали аналитически модифицированную кривую пика Брегга была работа 1996 г. Томаса Бортфильда [9], где он так называемым методом свертки описал модифицированный пик Брегга. Работа описанная здесь отличается от работы [9] и похожа только тем, что в настоящей работе используются в аналитической формуле функции параболического цилиндра. При создании вычислителя для нового типа детектора ДТеТ — телевизионного типа [1, 2], разработана математическая модель с аналитическим представлением кривой Брегга [8], которая основывается на экспериментально полученных результатах при энергиях протонного пучка от 60 до 150 МэВ. Совершенствование протонного варианта детектора ДТеТ позволило провести эксперименты в более широком диапазоне терапевтических энергий — от 30 до 250 МэВ, что обеспечило перекрытие терапевтического диапазона энергий ускорителя «Прометеус».

В данной работе используется аналитическая формула из работы [8], с помо-

щью которой описываются дополнительные данные эксперимента [2], полученные в декабрьском сеансе 2018 г. на ускорителе «Прометеус» в терапевтическом диапазоне энергий от 30 до 250 МэВ.

Выведенная ранее [8] аналитическая формула позволяет по величине  $z$ , измеренной детектором телевизионного типа, вычислить поглощенную дозу (в опорной точке  $z$  в светящемся пике Брегга):

$$\begin{aligned} DOZA(z) = & K_1 e^{-39,0625(R_0 - z)^2} [K_2 D_{-1,565}(-12,5(R_0 - z)) + \\ & + 140,75 D_{-0,565}(-12,5(R_0 - z))], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — константы;  $R_0$  — параметр при заданной начальной энергии  $E_0$  налетающего протона [10];  $z$  — точка (текущая глубина) в водном фантоме, измеренная детектором;  $D_{-1,565}$ ,  $D_{-0,565}$  — функции параболического цилиндра.

Основным механизмом здесь является функция параболического цилиндра  $D_{-0,565}$  и  $D_{-1,565}$ , два члена которой (как разные амплитуды) позволяют правильно описать кривые Брегга как  $DOZA(z)$ .

Совершенствование математической модели заключалось в подборе новых коэффициентов в формуле (1) и параметра  $R_0$ , при которых удалось получить удовлетворительное описание пиков Брегга в расширенном интервале энергий от 30 до 250 МэВ.

В таблице приведены результаты работ по определению коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и параметра  $R_0$  для значений энергий в диапазоне 30—250 МэВ.

В диапазоне энергий 30—150 МэВ графическое

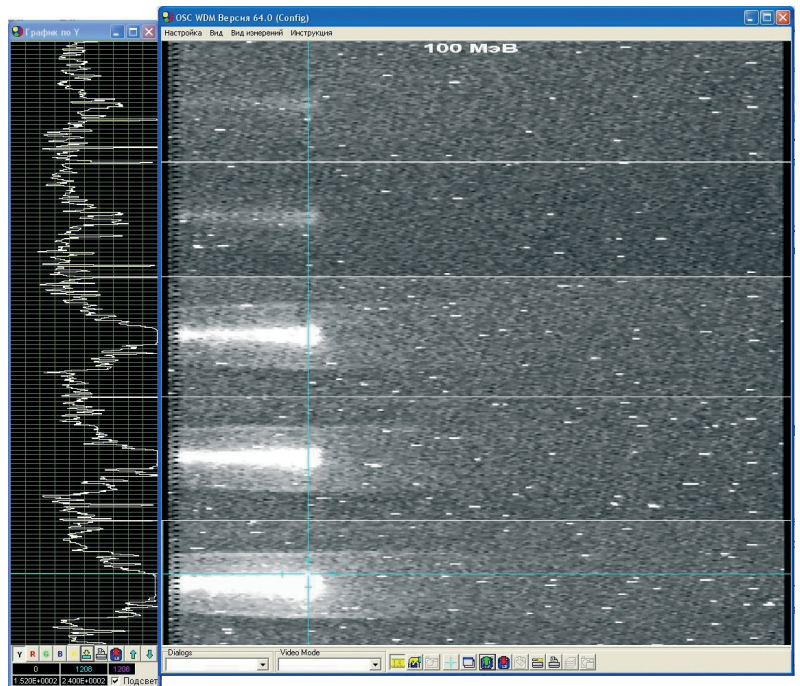


Рис. 2. События зарегистрированные детектором ДТеТ для режима «включения разных экспозиций» при энергии пучка ускорителя «Прометеус» 100 МэВ

Fig. 2. Events recorded by the TTD detector for the «inclusion of different exposures» mode at a beam energy of the Prometeus accelerator of 100 MeV



**Константы и параметры аналитического выражения (1)** [Constants and parameters of the analytical expression (1)]

Энергия, МэВ	Параметр		
	$K_1$	$K_2$	$R_0$ , см
30	0,03086760	2,897270	0,90400
40	0,03535980	1,791470	1,51560
50	0,02804338	1,256150	2,25375
60	0,01850970	0,952300	3,11480
70	0,02287800	0,162501	4,09400
100	0,01537850	0,478279	7,71000
150	0,01130440	0,314271	15,7512
190	0,00840787	0,261445	23,7178
195	0,00832406	0,256905	24,7956
200	0,00805753	0,252682	25,8900
210	0,00771640	0,245074	28,1265
220	0,00703310	0,238424	30,4236
230	0,00654000	0,232577	32,7772
240	0,00624430	0,227408	35,1836
250	0,00586959	0,222815	37,6387

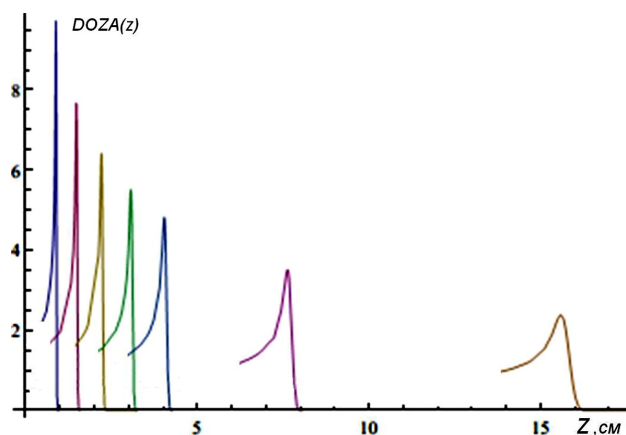


Рис. 3. Кривые пиков Брегга, определенные по формуле (1) для энергий 30, 40, 50, 60, 70, 100 и 150 МэВ

Fig. 3. Bragg peak curves determined by formula (1) for energies 30, 40, 50, 60, 70, 100, and 150 MeV

представление пиков Брегга показано на рис. 3 для энергий 30, 40, 50, 60, 70, 100 и 150 МэВ.

Далее, используя результаты расчета по формуле (1), вычислялась доза в водном фантоме в максимуме пика Брегга в сГр на один падающий протон. При известном значении количества падающих протонов за импульс, полученном по интерфейсу связи от ускорителя, вычислитель ДТет осуществляет умножение и определение величины выделенной дозы.

Аппроксимация дозы полиномом 5-й степени,

с учетом новых значений энергий для диапазона энергий 30—150 МэВ была проведена статистическая обработка нелинейным методом наименьших квадратов и определены параметры полинома 5-й степени. Получено новое уравнение:

$$\begin{aligned} DOZA(z) = & \\ = & 13,14007 - 4,82709z + 1,07325z^2 - 0,121409z^3 + \\ & + 0,00658z^4 - 0,000136z^5, \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 4 приведены новые точки в диапазоне энергий 30—150 МэВ, определенные из формулы (1), и аппроксимирующая кривая, определяемая формулой (2).

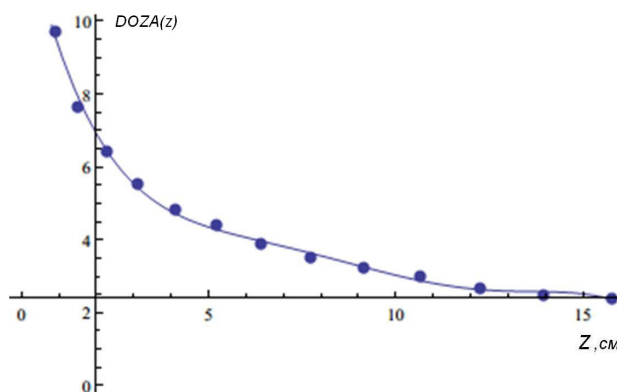


Рис. 4. Аппроксимирующая кривая по формуле (2) и точки, определенные по формуле (1) для энергий 30—150 МэВ

Fig. 4. The approximating curve by formula (2) and the points determined by formula (1) for energies of 30—150 MeV

Формула (2)  $DOZA(z)$  выведенная для практических значений применяемых интенсивностей, позволяет осуществлять конечные дозовые расчеты непосредственно вычислителем детектора в диапазоне энергий 30—150 МэВ. Аналогично описанному выше способу была получена формула (3) для вычисления  $DOZA(z)$  в интервале импульсов 150—250 МэВ.

$$\begin{aligned} DOZA(z) = & \\ = & -0,13823 + 0,74755z - 0,06985z^2 + \\ & + 0,0028198z^3 - 0,000054026z^4 + 4,0067 \cdot 10^{-7}z^5, \end{aligned} \quad (3)$$

### Методы облучения протонами

Методы формирования пучка протонов для клинического применения можно разделить на пассивное рассеяние и сканирование «карандашным пучком».

Ускорители типа циклотрон и синхроциклотрон выводят пучки протонов с фиксированной максимальной энергией и для изменения энергии протонов в пределах 70—250 МэВ необходимо вводить систему выбора энергии. Это решается с помощью клиньев из углеродосодержащего материала, вводимых механическим способом на пути движения выведенного из ускорителя пучка. Механизм перемещения клиньев изменяет пробег протонов в тканеэквив-

валентной мишени с шагом 5 мм пробега за 50 мс. После взаимодействия с клиньями энергетический спектр пучка протонов изменяется и, для выбора нужной энергии протонов, на пути пучка устанавливают поворотный магнит, который направляет протоны с разными энергиями по разным углам. Чтобы убрать вторичные частицы, устанавливают коллиматор, пропускающий протоны с заданной энергией. Технически деградаторы (оборудование для изменения энергии пучка) являются сложными механическими устройствами повышающими стоимость конечного оборудования. До мишени доходит только незначительная часть пучка, а остальная часть протонов преобразуется во вторичное излучение, в основном в потоки вторичных нейтронов, которые могут привести к отрицательным эффектам при сеансах протонной терапии по такой технологии. Вопрос выхода мощности потоков вторичных нейтронов и гамма-излучения, подробно изучались автором на ускорителе «Прометеус». Но интенсивность пучка на «Прометеусе» равна не более  $10^9$  протонов за импульс. А циклотроны и мощные линейные ускорители типа ИЯИ РАН г. Троицк, где так же применяется деградаторы пучка — не позволяют проводить конформное (без большого фона вторичных нейтронов и гамма-квантов) облучение мишени. Этот вопрос по влиянию мощного потока вторичных нейтронов в методе деградатора изучался слабо. Поэтому за деградатором приходится существенно усиливать биологическую защиту и повышать требования к надежности установленного в этой зоне оборудования. Это приводит также к увеличению стоимости оборудования и увеличивает риски появления вторичных эффектов при практическом применению данного метода пассивного облучения в практической протонной терапии.

Второй метод, который применяется на ускорителе «Прометеус» — это метод активного сканирования «карандашным» пучком. В этом способе анализирующем импульсное сканирование пучком мишени, проявляется методика «карандашного пучка». Метод активного сканирования состоит в применении для облучения опухоли тонкого («карандашного») пучка с диаметром 3—5 мм. Объем опухоли при этом разбивается на срезы (не более 100), как при компьютерной томографии. При переходе на следующий срез изменяется энергия пучка. На срезе сканирование может осуществляться в трех режимах:

- точечное — при переходе от вокселя 24 к вокселю среза пучок выключается;
- растровое — переход пучка происходит непрерывно, а формирование дозы регулируется скоростью перемещения пучка;
- непрерывное сканирование с переменной интенсивностью — растровое сканирование с модулированием интенсивности пучка. Воксел (от англ.

*volumetric pixel*) — элементарный объем, аналог двумерных пикселей для трехмерного пространства.

Из-за отсутствия рассеивающей системы деградаторов «карандашный» пучок используется более эффективно. Кроме того нет потока вторичных нейтронов и гамма-квантов, рожденных в материале. Метод активного сканирования состоит в использовании для облучения опухоли «карандашного» пучка с диаметром 3—5 мм. Объем опухоли при этом разбивается на срезы (обычно до 100), как при компьютерной томографии. При переходе на следующий срез изменяется энергия пучка. На срезе сканирование может осуществляться в трех режимах:

- точечное — при переходе от вокселя [24] к вокселю среза пучок выключается;
- растровое — переход пучка на срезы и воксели происходит непрерывно, а формирование дозы регулируется скоростью перемещения пучка;
- непрерывное сканирование с переменной интенсивностью — растровое сканирование с модулированием интенсивности пучка.

Из-за отсутствия рассеивающей системы деградатора «карандашный» пучок ускорителя «Прометеус» используется более эффективно. Кроме того нет потока вторичных частиц, рожденных в материале гребенчатого фильтра и потерь энергии в нем и в элементах рассеивающей системы, что на несколько порядков снижает вторичное излучение — разрушающее электронные узлы оборудования. Метод «карандашного» пучка существенно повышает конформность (точность подведения дозы к мишени при одновременном сильном снижении фона вторичных частиц) проведения сеансов протонной терапии.

Приведем список некоторых теоретических работ других авторов — где описывались методы облучения в протонной терапии а так же модели распределений дозных полей в тканезквивалентных фантомах [11—19].

#### **Возможность создания математической модели описывающей с помощью амплитуд — основные дозовые характеристики клинического протонного пучка ускорителя «Прометеус»**

Из определенных в предыдущем разделе статьи параметров — из таблицы и формулы (1) можно построить кривую пика Брэгга для импульса 100 МэВ, которая приведена на рис. 5 и 6. Размерность по координате — глубина дана в см. Введем определение дозовых параметров применяемых в клинической протонной терапии для пика Брэгга:

- $d_{20}$ ,  $d_{80}$ ,  $d_{90}$  — уровни 20, 80 и 90 % дозы в дистальной (правой части пика) части пика Брэгга изображенного на рис. 5

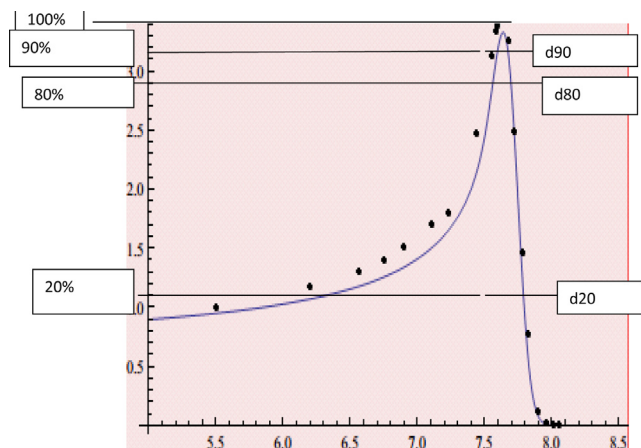


Рис. 5. Кривая пика Брэгга, определенная по формуле (1) описанной в предыдущем разделе статьи для энергии 100 МэВ с приведением дозовых параметров — d20, d89 и d90

Fig. 5. The Bragg peak curve defined by formula (1) described in the previous section of the article for an energy of 100 MeV with dose parameters d20, d89 and d90

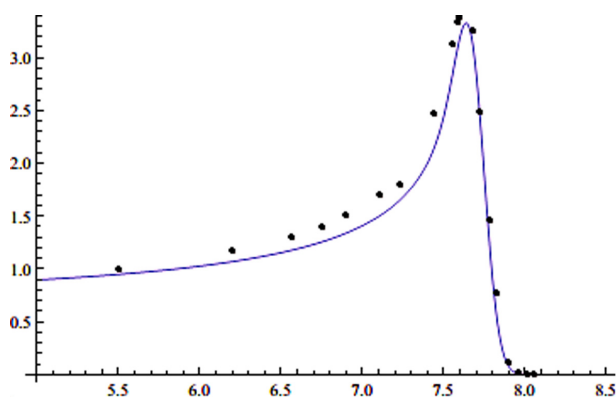


Рис. 6. Кривая пика Брэгга, определенная по формуле (1) описанной в предыдущем разделе статьи для энергии 100 МэВ. Точки это экспериментальные точки из таблиц [10] Janni, которые совпадают с расчетами программой FLUKA [6, 7]

Fig. 6. The Bragg peak curve defined by formula (1) described in the previous section of the article for an energy of 100 MeV. Points are experimental points from tables [10] by Janni, which coincide with calculations by the FLUKA program [6, 7]

В нашем экспериментальном опыте измеряемыми величинами являются дозы четыре дозы:

- DOZA( $Z^{d0,8}$ ) — это доза по глубине на уровне 80 % от максимальной;
- DOZA( $Z^{d0,2}$ ) — это доза по глубине (координате  $z$ ) для уровня 20 % от максимума;

Также вводится дозное распределение по координате  $y$  (ширина профиля) и соответственно измеряемыми величинами по координате  $y$  (ширина) являются:

- DOZA( $Y^{d0,8}$ ) и DOZA( $Y^{d0,2}$ ).

В работах по «амплитудному анализу» или так называемому «полному опыту», описанному в работах [16, 17], автором был впервые применен данный математический подход. Четыре дозы, которые можно измерить экспериментально — представляются в виде выражения повторяющего формулу (1), но вместо функций параболического цилиндра  $D_{-1,565}$

и  $D_{-0,565}$  подставляются амплитуды  $F_{\pm}$  и  $F_{++}$  — в итоге получаем систему из четырех уравнений, где амплитуды комплексные величины:

$$\text{DOZA}(z)d0,8 = K_1 e^{-a1(R_0 - z)^2} [K_2 F_{\pm} (-a2(R_0 - z)) + a3 F_{++} (-a2(R_0 - z))],$$

$$\text{DOZA}(z)d0,2 = K_1 e^{-b1(R_0 - z)^2} [K_2 F_{\pm} (-b2(R_0 - z)) + b3 F_{++} (-b2(R_0 - z))],$$

$$\text{DOZA}(y)d0,8 = K_1 e^{-c1(R_0 - y)^2} [K_2 F_{\pm} (-c2(R_0 - y)) + c3 F_{++} (-c2(R_0 - y))],$$

$$\text{DOZA}(y)d0,2 = K_1 e^{-d1(R_0 - y)^2} [K_2 F_{\pm} (-d2(R_0 - y)) + d3 F_{++} (-d2(R_0 - y))],$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — константы;  $R_0$  — параметр при заданной начальной энергии  $E_0$  налетающего протона [10];  $z$  — точка (текущая глубина) в водном фантоме, измеренная детектором;  $y$  — точка (текущая ширина) в водном фантоме, измеренная детектором;  $a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2, c3, d1, d2$  и  $d3$  — параметры которые определяются при фитировании экспериментальных данных;  $F_{\pm}$  и  $F_{++}$  — это амплитуды введенные в эти 4 уравнения (амплитуды являются комплексными величинами) и в дальнейшем их называем «амплитудами дозного поля».

«Полный опыт» заключается в следующем — в левой части мы имеем известные четыре измеряемые величины (для всего интервала  $z$  и  $y$ ). Решая систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными, мы определим реальные и мнимые части этих двух амплитуд  $F_{\pm}$  и  $F_{++}$  для всего интервала измеряемых величин  $z$  и  $y$ . Фазы амплитуд  $F_{\pm}$  и  $F_{++}$  должны отличаться.

Решив эту систему уравнений, можно будет определить эти амплитуды. В дальнейшем с помощью этих амплитуд, можно будет описывать глубинное и профильное распределение поглощенной дозы в тканеэквивалентном водном фантоме. Это позволит определять основные клинические параметры модифицированного пика Брэгга.

## Заключение

Рассмотрен алгоритм и особенности работа электронного тракта детектора ДТеТ. В статье приведены оригинальные экспериментальные результаты полученные на ускорителе «Прометеус» в г. Протвино, где детектор ДТеТ осуществил уверенное наблюдение энерговыделения протонного пучка в водном фантоме — в диапазоне энергий от 30 до 260 МэВ, что позволило быстро определять основные дозовые характеристики протонного пучка.

Автором была разработана новая аналитическая модель с применением функций параболического цилиндра, которая с точностью соответ-



ствующей рекомендациям МАГАТЭ [5], описала дозное распределение в водном фантоме в интервале энергий от 30 до 250 МэВ. Сделано предположение о возможности применения математического приема разработанного автором при изучении поляризационных параметров на ускорителе в ИФВЭ г. Протвино по так называемому «полному опыту». Данный метод — перенесен зеркально на проблему измерения и теоретического предсказания дозных профилей в водном фантоме. Первая модель разработанная автором — хорошо описывает кривую Брэгга в области максимального энергосодержания в пике Брэгга для всего теоретического диапазона энергий от 30 до 250 МэВ. Данный метод позволяет быстро в режиме on-line вычислять дозные распределения с учетом геометрических параметров терапевтического сеанса.

#### Библиографический список

1. Сиксин В. В. Пути совершенствования детектора ДТет // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. 2018. Т. 45, № 12. С. 78—82.
2. Сиксин В. В. Измерение профилей пиков Брэгга детектором ДТет // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. 2019. Т. 46, № 2. С. 47—52.
3. Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. М.: Радио и связь, 1986. 183 с.
4. Патент РФ № 2654838. Способ измерения энергосодержания от ионизирующих излучений. В. В. Сиксин, 2018.
5. Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, PAHO и ESTRO. Серия технических докладов № 398. Вена, Международное агентство по Атомной энергии, 2004.
6. Официальный сайт пакета FLUKA. URL: <http://www.fluka.org>
7. Ferrari A., Sala P. R., Fassò A., Ranft J. FLUKA: a multi-particle transport code // CERN-2005-10, INFN/TC 05/11, SLAC-R-773. 2005.
8. Гринкевич А. В., Сиксин В. В. Аналитическое представление кривой Брэгга для работы с детектором телевизионного типа на радиотерапевтическом ускорителе // Медицинская физика. 2018. № 2. С. 39—42.
9. Bortfeld T., Schlegel W. An analytical approximation of depth-dose distributions for therapeutic proton beams // Phys. Med. Biol. 1996. V. 41, N 8. P. 1331—1339. DOI: 10.1088/0031-9155/41/8/006
10. Janni J. F. Energy loss, range, path length, time-of-flight, straggling, multiple scattering, and nuclear interaction probability // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1982. V. 27, Iss. 2-3. P. 147—339. DOI: 10.1016/0092-640X(82)90004-3
11. Черняев А. П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004. 152 с.
12. Ломанов М. Ф. Физические аспекты применения пучков протонов с энергией 50—250 МэВ в медико-биологических исследованиях. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИТЭФ, 1984. 301 с.
13. Хорошков В. С. Протонный медико-биологический пучок синхротона ИТЭФ. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИТЭФ, 1970. 20 с.
14. Ломанов М. Ф. О возможности релятивистского возрастания биологической эффективности // Вопросы микродозиметрии. Тр. 1 Всесоюзного совещания по микродозиметрии. Вып. 1. М.: Атомиздат, 1973. С. 107—112.
15. Брилли О. Д., Вихров А. И., Городков С. С. и др. Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей. М.: Атомиздат, 1968. 264 с.
16. Ломанов М. Ф., Резник Б. И., Шимчук Г. Г., Яковлев Р. М. В кн: Вопросы микродозиметрии / под ред. В. И. Иванова. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 2. С. 64—67.
17. Лосев Д. В., Ломанов М. Ф., Черняев А. П. Аналитический расчет модифицированной кривой Брэгга. Препринт НИИЯФ МГУ, 2003-16/729.
18. Rintaro Fujimoto, Tsuneya Kurihara, Yoshihiko Nagamine. GPU-based fast pencil beam algorithm for proton therapy // Phys. Med. Biol. 2011. V. 56, N 5. P. 1319—1328. DOI: 10.1088/0031-9155/56/5/006
19. Egashira Y., Nishio T., Hotta K., Kohno R., Uesaka M. Application of the pencil-beam redefinition algorithm in heterogeneous media for proton beam therapy // Phys. Med. Biol. 2013. V. 58, N 4. P. 1169—1184. DOI: 10.1088/0031-9155/58/4/1169
20. Апокин В. Д., Васильев А. Н., Матуленко Ю. А., Мещанин А. П., Нурушев С. Б., Сиксин В. В., Соловьянов В. Л., Соловьев Л. Ф. Спиральные амплитуды пион-нуклонного рассеяния в интервале 0,05—0,7 (ГэВ/с)<sup>2</sup> при импульсе 40 ГэВ/с // Ядерная физика. 1983. Т. 38. С. 956.
21. Сиксин В. В. Анализ амплитуд пион-нуклонного рассеяния при импульсе 40 ГэВ/с: препринт ИФВЭ ОНФ 87-64. Протвино, 1987.

*Автор выражает благодарность В.Е. Балакину за возможность испытаний электронного тракта рабочего варианта ДТет в сеансе 7 декабря 2018 г. на ускорителе «Прометей».*

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2019 г.*

*Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 45—52. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-1-45-52*

## Algorithm of the electronic path of the TTD detector and theoretical models for the description of the modified Bragg curve

V. V. Siksin

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 53 Leninsky Prospekt, Moscow 119333, Russia*

**Abstract.** The features of the development of the electronic path of the TV channel of the television type detector (TTD) are considered. It is noted that the mode of binning (addition of pixels) is the most difficult in technical implementation. Calculations are made to improve the mathematical model for the computer detector television type. The parameters of the analytical formula valid for proton energies from 30 to 250 MeV, based on the combination of functions of the parabolic cylinder, consistent with numerical methods and new experimental data, are determined. A list of theoretical papers describing the modified Bragg curve is given.